

基于站域信息的整流站 100 Hz 保护优化方案

许婷苇¹, 赵丽平¹, 林 圣¹, 叶 烨²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要:对于现有仅利用单一设备量测量信息进行故障判断的 100 Hz 保护,其动作响应存在一定的盲目性,在换流站交流区域故障时适应性不足。对此提出基于站域信息区分整流站直流区域故障和交流区域故障,实现 100 Hz 保护优化,赋予 100 Hz 保护识别整流站直流区域故障与交流区域故障的能力。基于 100 Hz 保护误动原因分析,提出换流母线基频负序电压与直流线路二次谐波电压的相关系数,构建整流站故障区域识别方法。仿真结果表明,该方法不受故障类型、故障位置、过渡电阻、故障初始角以及噪声干扰的影响,可靠性高。

关键词:高压直流输电;100 Hz 保护;站域信息;故障区域;相关系数

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)05-0017-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210504

100 Hz Protection Optimization Scheme of Rectifier Station Based on Station Domain Information

Xu Tingwei¹, Zhao Liping¹, Lin Sheng¹, Ye Ye²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the existing 100 Hz protection using only a single device measurement information for fault judgment, the action response of the protection is blind to a certain extent, and its adaptability is insufficient when the AC area of converter station fails. It is proposed to distinguish the DC area fault from the AC area fault of rectifier station based on station domain information, which realizes 100 Hz protection optimization and gives 100 Hz protection the ability to identify the DC area fault and the AC area fault of rectifier station. Based on the cause analysis of misoperation of 100 Hz protection, the correlation coefficient between the negative sequence voltage of converter bus fundamental frequency and the second harmonic voltage of DC line is proposed, and the fault area identification method of rectifier station is constructed. The simulation results show that the method is not affected by fault type, fault location, transition resistance, fault initial angle and noise interference, and has high reliability.

Key words: HVDC; 100 Hz protection; station domain information; fault area; correlation coefficient

0 引言

随着交直流输电及其联网技术的发展,电网逐步形成交直流深度耦合的格局,带来了复杂的故障暂态特性,也给基于单一量测量信息的继电保护带来了严重影响^[1-3]。

在一些可能会导致阀的触发异常的故障发生时,如交流系统不对称故障、阀故障、阀基电子设备故障时,直流线路电流中会出现 100 Hz 分量,引起 100 Hz 保护动作,导致直流系统降功率运行甚至闭锁。已有研究指出,交流系统不对称故障期间,若能维持阀的正常换相,100 Hz 保护不动作有利于系统稳定^[4]。但按照目前实际工程中的保护策略及整定方式还不能区分两类故障,可能会带来因交流系

统不对称故障导致不必要的直流闭锁。例如,在天广直流“6·23事故”中,交流线路故障导致直流系统100 Hz分量增大,进而导致100 Hz保护误动作,高压直流输电系统误停运^[5]。

由于交直流混联系统的相互影响,导致基于单一量测量的保护的响应存在一定的盲目性^[6]。如交流系统不对称故障时,会在交流侧产生负序分量,经换流器传变后在直流侧产生100 Hz分量,从而可能引起直流100 Hz保护误动作。若此情况下,将交流侧测量信息与直流侧测量信息进行关联分析,则可准确识别出故障区域,从而避免100 Hz保护误动作。

下面分析了交流不对称故障导致100 Hz保护误动作原因,在此基础上,提出了故障区域识别方案。仿真结果表明,所提方案不受故障类型、故障位置、过渡电阻、故障初始角以及噪声干扰的影响。

1 100 Hz 保护误动机理分析

1.1 整流站交直流区域故障分布

整流站交直流区域故障分布如图1所示,以换流变压器与换流器的连接为界,将整流站划分为整流站直流区域与交流区域。图中: L_1-L_n 为整流站区外 n 条送电交流线路; S_1-S_n 分别为远端的等效送电交流电源; f_1-L_h 和 f_2 为整流站交流区域故障; f_3 和 f_4 为整流站直流区域故障。

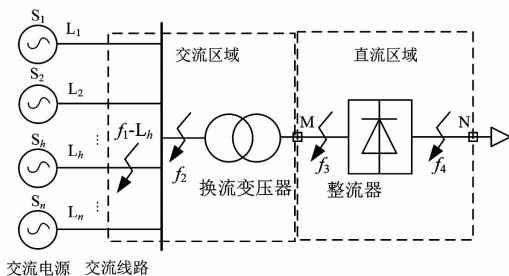


图1 整流站交直流区域故障分布

1.2 交流不对称故障导致100 Hz保护误动原因

近年来,工程现场曾出现由于交流不对称故障导致直流100 Hz保护误动作而闭锁直流系统的事件,对直流系统的正常稳定运行带来严重的影响。为避免在交流系统不对称故障期间100 Hz谐波保护误动作,首先应着手于其误动作的机理,即分析交流不对称故障导致直流侧100 Hz谐波分量增加的原因,从而提出对应的解决措施。

交流不对称故障使得交流母线处基频负序分量增加^[7],以下分析了换流器对交直流侧谐波的传变作用,阐述交流不对称故障导致100 Hz保护误动的机理。基于调制理论,使用换流器开关函数模型,以模拟换流器的非线性过程,从而得到交流电气量经换流器变换后的直流电气量。

直流场的电压可由式(1)表示。

$$u_{dc} = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc} \quad (1)$$

式中: u_a, u_b, u_c 分别为三相交流电压瞬时值; u_{dc} 为直流电压瞬时值; S_{ua}, S_{ub}, S_{uc} 为三相电压开关函数。开关函数可由式(2)表示。

$$\begin{aligned} S_{ua} &= \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cos \omega_1 t \\ S_{ub} &= \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cos \left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ S_{uc} &= \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cos \left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\omega_1 = 50 \text{ Hz}$ 。

当交流场三相电压不对称时,可将三相不对称电压经序分量分解为

$$\begin{cases} u_a = \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^+ \cos(\omega_m t + \alpha^+) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^- \cos(\omega_m t + \alpha^-) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^0 \cos(\omega_m t + \alpha^0) \\ u_b = \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^+ \cos\left(\omega_m t + \alpha^+ - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^- \cos\left(\omega_m t + \alpha^- + \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^0 \cos(\omega_m t + \alpha^0) \\ u_c = \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^+ \cos\left(\omega_m t + \alpha^+ + \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^- \cos\left(\omega_m t + \alpha^- - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} U_{m_ac}^0 \cos(\omega_m t + \alpha^0) \end{cases} \quad (3)$$

式中, m 为谐波次数。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$\sum_{m=1}^{\infty} u_{m_dc} = \frac{6\sqrt{3}N_2}{\pi N_1} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ U_{m_ac}^+ \cos[(\omega_m - \omega_1)t + \alpha^+] + U_{m_ac}^- \cos[(\omega_m + \omega_1)t + \alpha^-] \right\} \quad (4)$$

式(4)代表交流场谐波电压经换流器传变后对应的直流场谐波电压。

由式(4)可得,直流侧100 Hz谐波电压为

$$u_{2\text{-dc}} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} \frac{N_2}{N_1} \left[\begin{array}{l} U_{1\text{-ac}}^- \cos(2\omega_1 t + \alpha^-) \\ + U_{3\text{-ac}}^+ \cos(2\omega_1 t + \alpha^+) \end{array} \right] \quad (5)$$

由式(5)可得,交流场负序基频电压和正序3次谐波电压将在直流场传变出100 Hz分量,且由于负序基频电压幅值较大而起主要作用。

综上,交流侧发生不对称短路故障时,交流场负序基频电压与直流场100 Hz分量呈正相关,是造成直流100 Hz保护误动的原因。因此,为了辨识是由于交流侧发生不对称短路故障产生的100 Hz谐波电流,可通过引入交流母线处负序基频电压,并判断其与直流二次谐波电压的相关程度,形成基于站域信息的直流100 Hz保护优化方案。

2 故障区域识别方案

2.1 故障区域识别判据

引入 R 表示交流场负序基频电压与直流场100 Hz分量的相关度系数。

$$R = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{U_{\text{dl}2}(k)}{U_1^-(k)} - \frac{U_{\text{dl}2}(k-1)}{U_1^-(k-1)} \right)^2} \quad (6)$$

式中: U_1^- 为交流母线电压基频负序分量幅值; $U_{\text{dl}2}$ 为直流线路电压二次谐波分量幅值; $k=1$ 为保护算法启动时刻; N 为积分时间窗长内的采样点数。

当交流区域发生不对称故障时,换流母线负序分量增加,经换流器的传变作用后在直流侧产生100 Hz分量,换流母线负序电压与直流100 Hz分量相关性高,波形形态相近,由式(6)可知 R 较小;当直流区域故障时,直流100 Hz分量是由于三相开关函数波形不对称所引起的^[9],换流母线负序分量与直流100 Hz分量相关性低, R 较大。因此,判断 $R < k_{\text{set}}$ 是否成立,若是,则判断发生的故障为整流站交流区域故障;若否,则判断发生的故障为整流站直流区域故障,其中 k_{set} 为故障识别阈值,考虑到换流母线正序3次谐波电压也是100 Hz的产生原因,因此 k_{set} 取5。

2.2 启动判据

保护算法启动步骤采用电压故障分量启动元件来实现^[8],其对故障检测的原理为

$$\max(|\Delta u_A|, |\Delta u_B|, |\Delta u_C|) > \Delta u_{\text{set}} \quad (7)$$

式中: Δu_A 、 Δu_B 与 Δu_C 分别为交流母线三相电压所对应的故障分量; Δu_{set} 为保护算法启动门槛值,通常为0.01~0.1倍算法启动时刻所用电压的额定值。将保护算法启动时刻定义为交流母线电压故障分量最大值大于算法启动门槛值的时刻。

3 仿真验证与分析

3.1 仿真模型与参数

在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建送端连接有3条交流线路的±800 kV交直流系统仿真模型,模型中3条送电交流线路 L_1 — L_3 的长度分别为40 km、40 km、20 km。

3.2 典型故障仿真分析

3.2.1 整流站交流区域故障

在模型上设置交流线路 L_1 上点 f_1 — L_1 处A相发生金属性接地故障,故障位于距离换流母线20 km处,仿真图形如图2所示。

由图2中仿真结果可知,计算开始检测到故障后5 ms数据窗长内的数据,可得 $R = 1.5894 < 5$,可判断出该故障为整流站交流区域故障。

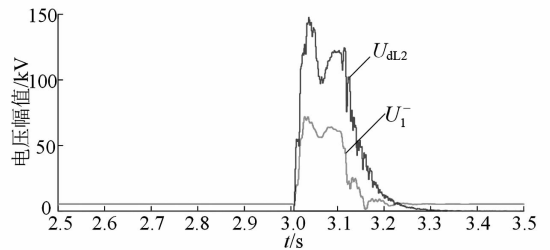


图2 交流区域故障仿真波形

3.2.2 整流站直流区域故障

在模型上设置换流变压器阀侧 f_3 处A相发生金属性接地故障,仿真图形如图3所示。

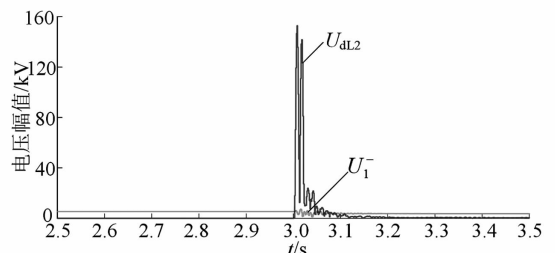


图3 直流区域故障仿真波形

由图3中仿真结果可知,计算开始检测到故障后5 ms数据窗长内的数据,可得 $R = 48.2002 > 5$,可判断出该故障为整流站直流区域故障。

3.3 适应性分析

3.3.1 不同故障类型和位置下的适应性分析

为验证所提故障识别方法在不同故障类型与不同故障位置下的适应性,分别在模型上设置不同故障类型与不同故障位置的整流站交流区域与直流区域故障,并利用所提算法对故障进行识别,得到的仿真结果如表 1 所示。其中: $f_1 - L_1$ 代表交流线路 L_1 上发生的故障, f_2 表示换流变压器网侧发生的故障,均为整流站交流区域故障; f_3 表示换流变压器阀侧故障, f_4 表示换流器直流侧出口故障,均为整流站直流区域故障。表中的故障位置代表 $f_1 - L_1$ 距离换流母线的距离; $f_1 - L_1 \sqrt{2} \sqrt{3}$ 的过渡电阻均为 15Ω ,故障初始角均为 0° ; f_4 的过渡电阻为 15Ω 。

表 1 不同故障类型和位置下的仿真结果

故障点	故障类型	故障位置/km	R	判断结果
$f_1 - L_1$	AG	10	1.855 6	交流区域故障
	AB	10	1.964 6	交流区域故障
	ABG	10	2.060 3	交流区域故障
	AG	25	1.989 6	交流区域故障
	AB	25	1.990 5	交流区域故障
	ABG	25	2.032 7	交流区域故障
f_2	AG	—	1.912 4	交流区域故障
	AB	—	1.935 7	交流区域故障
	ABG	—	2.024 9	交流区域故障
f_3	AG	—	63.707 6	直流区域故障
	AB	—	18.104 8	直流区域故障
	ABG	—	28.407 0	直流区域故障
	ABC	—	20.855 8	直流区域故障
f_4	—	—	45.050 9	直流区域故障

根据表 1 结果可知,在整流站交流区域内发生不同类型和不同位置的故障时, R 均小于 5,可得出故障发生在交流区域,属于交流区域故障;而在直流区域不同类型的故障发生时, R 均大于 5,从而可得出故障发生在直流区域,属于直流区域故障。因此可知,无论故障发生于整流站交流区域还是直流区域,所提方法均能够准确识别。

3.3.2 不同过渡电阻下的适应性分析

为验证所提故障识别方法在不同过渡电阻下的适应性,分别在模型上设置不同过渡电阻的整流站交流区域与直流区域故障,并利用所提算法对故障进行识别,得到的仿真结果如表 2 所示。以 A 相接地故障为例,其中 $f_1 - L_1$ 处发生的故障在距离换流母线 10 km 处,故障初始角均为 0° 。

根据表 2 结果可知,在整流站交流区域内发生不同过渡电阻下的故障时, R 均小于 5,此时判断发

表 2 不同过渡电阻下的仿真结果

故障点	过渡电阻/ Ω	R	判断结果
$f_1 - L_1$	0	1.691 3	交流区域故障
	30	1.932 0	交流区域故障
	200	2.179 8	交流区域故障
f_3	0	48.200 2	直流区域故障
	30	39.025 5	直流区域故障
	200	34.439 5	直流区域故障

生的故障为整流站交流区域故障;在整流站直流区域内发生不同过渡电阻下的故障时, R 均大于 5,此时判断发生的故障为整流站直流区域故障。因此可知,无论故障发生于整流站交流区域还是直流区域,所提方法均能够准确识别。

3.3.3 不同故障初始角下的适应性分析

为验证所提故障识别方法在不同故障初始角下的适应性,分别在模型上设置不同故障初始角下的整流站交流区域与直流区域故障,并利用所提算法对故障进行识别,得到的仿真结果如表 3 所示。以 A 相接地故障为例(过渡电阻设置为 15Ω), $f_1 - L_1$ 处发生的故障在距离换流母线 10 km 处。

表 3 不同故障初始角下的仿真结果

故障点	故障初始角/ $^\circ$	R	判断结果
$f_1 - L_1$	18	1.663 9	交流区域故障
	90	1.839 7	交流区域故障
	150	1.714 4	交流区域故障
f_3	18	49.039 2	直流区域故障
	90	30.255 8	直流区域故障
	150	45.294 3	直流区域故障

根据表 3 结果可知,在整流站交流区域内发生不同故障初始角下的故障时, R 均小于 5,此时判断发生的故障为整流站交流区域故障;在整流站直流区域内发生不同故障初始角下的故障时, R 均大于 5,此时判断发生的故障为整流站直流区域故障。因此可知,无论故障发生于整流站交流区域还是直流区域,所提方法均能够准确识别。

3.3.4 噪声干扰下的适应性分析

为验证所提故障识别方法在噪声干扰下的适应性,在模型上设置不同程度噪声干扰下的整流站交流区域与直流区域故障,并利用所提算法对故障进行识别,以 A 相接地故障为例(过渡电阻设置为 15Ω), $f_1 - L_1$ 处发生的故障在距离换流母线 10 km 处,故障初始角为 0° ,在所得仿真数据中加入信噪比为 50 dB、40 dB 和 30 dB 的噪声。

(下转第 90 页)



图 5 返厂检查确认高压 A 相绕组匝间短路

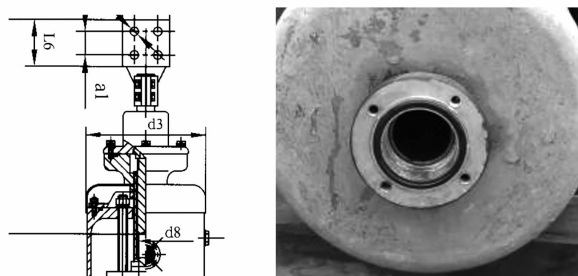


图 6 套管头部密封结构

该套管密封依靠 4 条紧固螺栓将导电头、胶垫及接线座紧固在一起,接线座内有空腔,安装固定主变压器引线导电棒的定位螺母和圆柱销。该结构由于接线座无防松动锁定装置,导线在受力摇摆后,紧固螺栓松动,会引起密封失效,雨水沿此进入变压器内部,如图 7 所示。

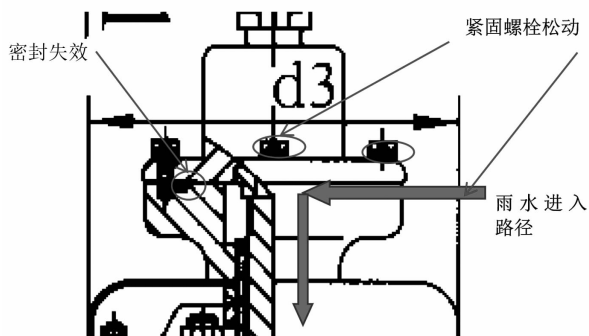


图 7 套管密封失效

2.2 主变压器套管安装结构

该套管为穿缆套管,从主变压器安装结构上可以看到,从套管顶部进入主变压器的雨水,将沿着高压套管、铜屏蔽管的通道,集中流入到了变压器高压绕组引流线部位,导致该处发生绕组匝间短路故障。如图 8 所示。

2.3 密封失效进水原因分析

该套管结构由于无防松动锁定装置,且主变压

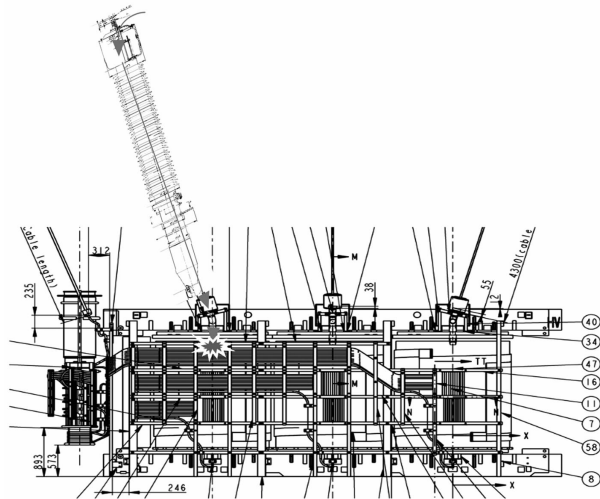


图 8 高压 A 相套管进水路径

器 220 kV 侧 A 相套管引流线较短,导致套管受力较大,由于该地区在故障发生前发生了多次地震及余震,引流线不断拉扯 A 相套管,导致套管将军帽处紧固螺栓不断松动,密封失效。同时,因该地区连续多日降雨,且温差较大,主变压器内部压力变化较大,因气压变化而引起的呼吸效应导致雨水从密封失效处渗入。另外,由于该台变压器的套管为穿缆式,高压绕组引流线穿过铜屏蔽管引出,套管末端直接对着高压绕组铜屏蔽管;从套管顶部进入内部的雨水,直接顺着高压套管、铜屏蔽管的通道,集中流入到了变压器高压绕组引流线部位,导致该处发生绕组匝间短路故障。

3 结论

1)穿缆式套管将军帽处密封不良将导致雨水沿套管通道进入变压器内部,从而引发内部绝缘击穿的严重故障。故应特别加强对穿缆式套管将军帽处密封的检查及维护。

2)该类型套管接线座、双封螺母 2 个部件与下端无紧固锁定装置,结构设计存在无防松动措施的设计缺陷,易于造成变压器进水,新安装套管不应再采用该结构。

3)对新安装的 220 kV 及以上等级变压器,应严格执行反事故措施关于“应核算引流线(含金具)对套管接线柱的作用力,确保不大于套管及接线端子弯曲负荷耐受值”的规定,防止套管受力过大而导致套管故障。

4)在遭受强震及连续较低强度地震后,应对在